

文章编号:1000-8055(2011)04-0931-04

基于权重系数的液体火箭发动机可靠性验证方案

李 进¹, 赵 宇¹, 李文钊², 杨 军¹

- (1. 北京航空航天大学 可靠性与系统工程学院, 北京 100191;
2. 中国运载火箭技术研究院 北京宇航系统工程研究所, 北京 100076)

摘 要: 针对现在液体火箭发动机的任务可靠度验证方案不考虑开、关机的影响或试验时间较长的问题,利用权重系数模型,综合了典型的利用二项分布和利用威布尔分布分别制定出的可靠性验证试验方案,提出了制定液体火箭发动机可靠性验证方案的方法.该方法可以在既考虑了发动机的持续时间的验证又兼顾了开机和关机过程的前提下制定出液体火箭发动机可靠性验证试验方案.所制定的方案利用了研制信息,节省可靠性验证试验的时间和费用.

关 键 词: 液体火箭发动机; 可靠性验证; 二项分布; 威布尔分布; 权重系数

中图分类号: TB302

文献标志码: A

Reliability compliance test plans for liquid-propellant rocket engine based on weighting factors

LI Jin¹, ZHAO Yu¹, LI Wen-zhao², YANG Jun¹

- (1. School of Reliability and Systems Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China;
2. Beijing Institute of Astronautical Systems Engineering, China Academy of Launch Vehicle Technology, Beijing 100076, China)

Abstract: The problem of liquid-propellant rocket engine's reliability compliance test plans at present is that ignoring the processes of firing and shutdown or the test taking too long. To solve this problem, considering typical compliance test plans of binomial distribution and Weibull distribution, using the weighting factors, the method of reliability compliance test plan developing was provided. The duration of firing was verified in this reliability compliance test plans developing method, at the same time the processes of firing and shutdowns were also considered. This reliability compliance test plan utilized development information and saved the test time and cost.

Key words: liquid-propellant rocket engine; reliability compliance; binomial distribution; Weibull distribution; weighting factors

液体火箭发动机是火箭的动力系统,其可靠性水平直接关系到火箭能否顺利地完成任务.液体火箭发动机可靠性指标的验证是保证其可靠性水平的重要途径.现在,液体火箭发动机任务可靠度的验证,一般只对工作时间进行,对开、关机过程并没有进行考虑.在任务过程中,液体火

箭发动机的开、关机是不能保证完全可靠的.因此,在液体火箭发动机任务可靠度的验证过程中,对开、关机过程进行验证也是十分必要的.

工程上对于液体火箭发动机任务可靠度的验证一般使用两种方法:一种是只考虑工作时间的指数分布验证方案^[1]或威布尔分布验证方案^[2],

收稿日期:2010-03-18; 修订日期:2010-11-16

作者简介:李进(1980—),男,北京昌平人,博士生,主要从事可靠性验证与评估研究.

这种方案没有考虑到发动机开、关机过程中,发动机的可靠性水平验证问题;另一种是将每个任务过程看成成败型,利用二项分布制定可靠性验证试验方案的方法,这种方法虽然考虑了开、关机过程中的故障问题,但是发动机的任务可靠度要求一般较高,即使使用允许故障次数为零的验证方案,其试验的时间和费用往往也是不能接受的。

权重系数模型是由 Lloyd 和 Lipow 提出的用于综合各种研制数据来评估液体火箭发动机可靠性水平的模型^[3]。该模型被美国汽车工程师学会标准^[1]中推荐使用,并在航天飞机主发动机(SSME)、航天运输主发动机(STME)和 J2 等发动机的可靠性评估中应用^[4]。

本文利用 Lloyd 和 Lipow 提出的权重系数的模型,结合二项分布的验证试验方案和威布尔分布的 Weibayes 方法^[5]综合考虑工作时间和开、关机可靠性给出液体火箭发动机基于权重系数的可靠性验证方案的制定方法。本文的可靠性验证方案仅考虑只有使用方风险和极限质量的情况,即看成验证液体火箭发动机可靠度在一定置信度下的置信下限是否满足要求。

1 典型的可靠性验证试验方案

1.1 二项分布

对于服从二项分布的产品,设 n 为试验次数, r 为其中的失败次数,则其在置信度为 $(1-\alpha)$ 时的可靠度下限 $R_{l,\alpha}$ 由公式(1)可得^[6]

$$\begin{cases} \sum_{i=0}^r \binom{n}{r} R_{l,\alpha}^{n-i} (1-R_{l,\alpha})^i = \alpha & r > 0 \\ R_{l,\alpha} = \alpha^{1/n} & r = 0 \end{cases} \quad (1)$$

对于二项分布产品可靠度下限的验证问题,在给定制信度、可靠度下限和允许失败次数后,即可以利用公式(1)反求出验证试验的次数。

1.2 威布尔分布

威布尔分布的 Weibayes 方法是假设形状参数 m 已知的情况下,对威布尔分布的特征量进行分析的一种方法。形状参数可以依据工程经验或数据给出,如过去的故障数据以及产品故障的故障机理等。

液体火箭发动机的工作时间一般认为是服从威布尔分布^[7-8]。同时,液体火箭发动机的可靠性水平要求一般较高,在研制的过程中,出现故障的次数很少,经常出现无一故障的情况^[9]。因此,这里只给出允许故障次数为 0 的情况下,威布尔分

布的 Weibayes 方法验证方案。

当形状参数 m 已知的情况下,设产品的工作时间为 $t_1, t_2, \dots, t_n$, 则特征寿命 η 的置信度为 $(1-\alpha)$ 的单侧置信下限 $\eta_{l,\alpha}$ 为^[5]

$$\eta_{l,\alpha} = \left[\frac{-\sum_{i=1}^n t_i^m}{\ln \alpha} \right]^{1/m} \quad (2)$$

利用可靠度和特征寿命之间的关系

$$R = \exp \left[- \left(\frac{t_0}{\eta} \right)^m \right]$$

其中 t_0 为任务时间,则可靠度的置信度为 $(1-\alpha)$ 的单侧置信下限 $R_{l,\alpha}$ 为

$$R_{l,\alpha} = \exp \left[- \left(\frac{t_0}{\eta_{l,\alpha}} \right)^m \right] \quad (3)$$

利用公式(3)给出寿命服从威布尔分布的产品,在允许故障数为 0 的条件下,验证方案制定方法如下:

- 1) 给定形状参数 m ;
- 2) 给定可靠度指标,置信度 $(1-\alpha)$ 下可靠度下限 $R_{l,\alpha}$;
- 3) 依据具体实际情况,给出可以用于验证试验的样本数量 n ;
- 4) 假设每个样本的试验时间相同,即 $t_1 = t_2 = \dots = t_n$;
- 5) 利用公式(2)和公式(3)计算验证试验的截尾时间 $t' = t_1 = t_2 = \dots = t_n$ 。

2 权重系数模型

2.1 权重系数

将液体火箭发动机的试验时间小于任务时间的所有试验分成 k 组,即 $(0, T_1), (0, T_2), \dots, (0, T_k), T_i (i=1, 2, \dots, k)$ 为发动机试验时间,同时 $T_k = t_0$ 为液体火箭发动机任务时间,则对于试验时间 T_i ,权重系数 ω_i 的定义为

$$\omega_i = \frac{p_i + \epsilon(1-p_i)}{p_k + \epsilon(1-p_k)}, \quad i = 1, 2, \dots, k$$

其中 p_i 代表在时间段 T_i 内的开机和持续运行的故障概率, p_k 代表发动机在整个任务过程中的故障概率, ϵ 为在发生故障导致必须提前关机的条件下的关机故障概率。

权重系数 ω_i 可以定义为在给定时间 T_k 内发生一个故障的条件下,在时间 T_i 内发生故障的条件概率。

2.2 权重系数的点估计

首先定义

N_i :第 i 组试验点火次数.

f_i :第 i 组试验关机故障次数.

f_{ij} :第 i 组试验在时间区间 (T_{j-1}, T_j) 中发生的普通故障次数(不包括开机和关机故障).

则记

$$H_i = N_i - f_i - \sum_{j=1}^i f_{ij}$$

$$F_j = \sum_{r=j}^k f_{rj}$$

$$G_i = \sum_{j=i}^k (F_j + H_j + f_j)$$

H_i 即为第 i 组试验的成功次数, F_i 即为第 j 列的普通故障次数, 则有

$$\hat{\varepsilon} = \frac{\sum_{r=1}^k f_r}{\sum_{r=1}^k H_r + \sum_{r=1}^k f_r}$$

$$\hat{p}_i = \hat{p}_{i-1} + \frac{F_i(1 - \hat{p}_{i-1})}{G_i}, \quad i = 1, 2, \dots, k$$

$$\hat{p}_0 \equiv 0$$

则权重系数的点估计 $\hat{\omega}_i$ 为^[3]

$$\hat{\omega}_i = \frac{\hat{p}_i + \hat{\varepsilon}(1 - \hat{p}_i)}{\hat{p}_k + \hat{\varepsilon}(1 - \hat{p}_k)}, \quad i = 1, 2, \dots, k.$$

3 基于权重系数的验证方案

如引言所述, 利用典型的二项分布和威布尔分布制定的可靠性验证试验方案, 都不能满足液体火箭发动机的可靠性验证的要求. 所以本文利用权重系数给出了新的可靠性验证试验方案的制定方法. 考虑液体火箭发动机工作时间和开、关机的任务可靠度的基于权重系数的验证方案的试验总时间要不小于利用威布尔分布的考虑工作时间的验证方案总时间, 同时, 其等价试验次数(利用权重系数)要不小于将任务过程看作成败型的二项分布验证方案的试验次数. 由于液体火箭发动机的可靠性水平要求较高, 所以, 本文仅给出允许故障数为零的可靠性验证试验方案的制定方法.

3.1 验证方案制定流程

基于权重系数的可靠性验证试验方案的制定流程如下:

1) 给出发动机需要验证的可靠性指标, 即在一定的置信度下的任务可靠度下限 $R_{i,\alpha}$;

2) 利用液体火箭发动机研制试验数据给出一组权重系数 $(\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_k)$;

3) 利用第 1.1 节的方法计算出二项分布的

验证试验方案, 记为试验次数为 n_b , 允许故障数为 0;

4) 利用第 1.2 节中的威布尔分布验证方案制定方法, 给定的形状参数 m , 假设试验样本量为 N , 得到验证试验的截尾时间, 记为 T_w , 允许故障次数为 0;

5) 利用 3.2 节方法, 使用该组权重系数制定可靠性验证试验方案.

3.2 基于权重系数的方案的制定方法

利用液体火箭发动机的研制试验数据, 其他相似发动机的数据或者其他的方法给出一组 k 个权重系数, 记为 $(T_1, \omega_1), (T_2, \omega_2), \dots, (T_k, \omega_k)$, $T_1 < T_2 < \dots < T_k$.

设误差 $\rho_i (i = 1, 2, \dots, k)$ 定义为

$$\rho_i = \sqrt{\frac{1}{2} \left(\frac{T_k n_{m,i} - T_w}{T_w} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{\omega_i n_{m,i} - n_b/N}{n_b/N} \right)^2}$$

其中

$$n_{m,i} = \min\{n \mid nT_i \geq T_w, n\omega_i \geq n_b/N\},$$

$$i = 1, 2, \dots, k$$

则所制定的验证方案为 $(N, T_j, n_{m,j}, 0)$, 即试验样本为 N 个, 每个试验样本进行 $n_{m,j}$ 次试验, 每次试验的时间为 T_j , 允许故障次数(包括持续运行故障和开、关机故障)为 0, 其中 $J = \max_{i=1,2,\dots,k} \{i \mid \rho_i \leq \rho_0\}$, ρ_0 为给定的允许误差.

可以看出, 所制定的可靠性验证方案, 针对不同的权重系数组, 最长的试验总时间与二项分布验证方案的总试验时间相同. 所以, 基于权重系数的可靠性验证方案可以节省验证试验总时间.

4 示例

利用参考文献[3]中的示例(P470), 该液体火箭发动机任务时间为 140 s, 其依据研制试验数据所得到的一组权重系数见表 1.

表 1 权重系数表

Table 1 Table of weighting factors

i	T_i/s	ω_i
1	10	0.551
2	20	0.600
3	40	0.746
4	60	0.817
5	100	0.961
6	140	1.000

假设该型发动机可以用于可靠性验证的发动机为4台,要验证该发动机的置信度为80%的可靠度下限为0.99.

依据上述条件利用第2.1节的方法可得二项分布下,该型发动机需要进行160次试验,允许故障次数为0,即每台发动机进行40次试验,4台样机总试验时间为22400 s.

依据液体火箭发动机通常情况下形状参数的取值范围^[9-11],分别取形状参数 $m=1.3, 1.5, 2$, 利用第2.2节和第4节的方法制定液体火箭发动机的基于权重系数的可靠性验证方案如表2,方案制定过程中取 $\rho_0=0.25$.

表2 验证试验方案表
Table 2 Table of compliance test plans

m	验证试验方案	试验总时间/s
1.3	(4,60 s,49,0)	11760
1.5	(4,40 s,54,0)	8640
2	(4,10 s,89,0)	3560

由示例可以看出,利用本文的方法可以在验证发动机工作时间的同时考虑开、关机,在示例中所制定的验证方案比利用二项分布所制定的方案节省试验时间,并达到同样的验证效果.同时,考虑到液体火箭发动机特殊燃料的高昂费用^[3,12],本文方法所制定的方案有助于节省可靠性验证试验的费用.

5 结论

本文给出的利用权重系数的模型的液体发动机基于权重系数的可靠性验证方案的方法,结合发动机研制试验数据或其他信息,给出的方案既考虑工作时间的验证,同时兼顾了发动机开机和关机过程,并且由示例表明可以节省验证试验的总时间和试验费用.

参考文献:

- [1] Committee of G-11 Reliability Maint Support and Probabilistic Methods. ARP4900 Liquid rocket engine reliability certification[S]. USA:SAE International,1996.
- [2] 冯静,刘琦,周经纶,等.基于最优置信限法的液体火箭发动机可靠性鉴定验收方案[J].质量与可靠性,2003(1):29-32.
- [3] FENG Jing, LIU Qi, ZHOU Jinglun, et al. The reliability qualification test plan for liquid rocket engine based on optimal confidence limit method[J]. Quality and Reliability, 2003(1):29-32. (in Chinese)
- [4] Lloyd D K, Lipow M. Reliability: management, methods, and mathematics[M]. New Jersey: Prentice-Hall Inc., 1962.
- [5] Pugh R L. Space transportation main engine reliability demonstration technique[C]// Proceedings Annual Reliability and Maintainability Symposium. Atlanta: IEEE, 1993:173-180.
- [6] Committee of DS/1 Dependability and terotechnology. BS EN 61649:2008 Weibull analysis[S]. UK:BSI,2009.
- [7] 贺国芳.可靠性数据的收集与分析[M].北京:国防工业出版社,1995.
- [8] 王婷婷,师义民,刘英.某型号液体火箭发动机可靠性分析[J].航天控制,2009,27(6):79-82.
- [9] WANG Tingting, SHI Yimin, LIU Ying. Reliability analysis for a kind of liquid rocket[J]. Aerospace Control, 2009, 27(6):79-82. (in Chinese)
- [10] 宁江凡,鄢小清,张士峰.液体火箭发动机无失效条件下的可靠性分析方法[J].国防科技大学学报,2006,28(5):22-25.
- [11] NING Jiangfan, YAN Xiaoqing, ZHANG Shifeng. Study on reliability anlysis method for liquid rocket engine in the case of zero-failure data[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2006, 28(5):22-25. (in Chinese)
- [12] 刘琦,冯静,周经纶.基于Gompertz模型的液体火箭发动机可靠性增长分析[J].航空动力学报,2004,19(3):419-423.
- [13] LIU Qi, FENG Jing, ZHOU Jinglun. The reliability growth analysis for liquid rocket engine according to the Gompertz model[J]. Journal of Aerospace Power, 2004, 19(3):419-423. (in Chinese)
- [14] 姜祥周,师义民,沈政.无失效数据下液体火箭发动机可靠性多层 Bayes 估计[J].航空控制,2008,26(3):88-91.
- [15] JIANG Xianzhou, SHI Yimin, SHEN Zheng. The hierarchical Bayes reliability estimation for liquid rocket engine with zero-failure data[J]. Aerospace Control, 2008, 26(3):88-91. (in Chinese)
- [16] 李宝盛,郝京辉.液体火箭发动机寿命可靠性的贝叶斯下限[J].导弹与航天运载技术,2009(4):8-10.
- [17] LI Baosheng, HAO Jinghui. Bayesian lower limit of lifetime reliability for liquid propellant rocket engine[J]. Missile and Space Vehicle, 2009(4):8-10. (in Chinese)
- [18] Murphy T, Voss N. Liquid rocket engine acceptance testing: improved system reliability without hotfire[C]// Proceedings of 32nd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference. Lake Buena Vista: AIAA, 1996:1-6.